



**Análisis de transformación de la cobertura vegetal a causa de minería en la subregión del
Bajo Cauca Antioqueño utilizando imágenes satelitales Landsat**

Paula Andrea Herrera Présiga

Proyecto de práctica para optar al título de Ingeniera Ambiental

Semestre de Industria

John Fernando Escobar Martínez Phd en Ingeniería

Universidad de Antioquia

Escuela Ambiental

Ingeniería Ambiental

Medellín

2024

Cita	(Herrera, 2024)
Referencia	(Herrera, 2024). <i>Análisis de transformación de la cobertura vegetal a causa de minería en la subregión del Bajo Cauca Antioqueño utilizando imágenes satelitales Landsat</i> [Semestre de industria]. Universidad de Antioquia, Medellín.
Estilo APA 7 (2020)	



CENDOI

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mis padres y a mi hermana por tanto amor y apoyo durante este largo proceso, a mi abuelo por siempre ver lo mejor de mí y sin duda alguna, a mí misma por todos los esfuerzos y sacrificios para llegar a este punto.

Si en algún momento dudé de mí, estoy segura de que mi familia nunca lo hizo, por eso esto es por y para ellos.

Agradecimientos

A la Universidad de Antioquia por ser mi segunda casa durante todos estos años, por ser un espacio de constante aprendizaje y de socialización, a mis profesores porque se nota su esfuerzo en pro del conocimiento y a mi asesor de prácticas que me apoyó y me tuvo paciencia todo este tiempo.

Tabla de contenido

Resumen	8
Abstract	9
1 Introducción	10
2 Planteamiento del problema	12
2.1 Antecedentes	12
3 Justificación	13
4 Objetivos	15
4.1 Objetivo general	15
4.2 Objetivos específicos	15
5 Marco teórico	16
6 Metodología	20
7 Resultados	25
8 Discusión	32
9 Conclusiones	33
10 Referencias	34

Lista de Tablas

Tabla 1 Minería Bajo Cauca Antioqueño	30
Tabla 2 Área de los municipios	30
Tabla 3 Porcentaje de minería respecto al área del municipio	31
Tabla 4 Minería Bajo Cauca Antioqueño	31

Lista de figuras

Figura 1 Mapa de localización del Bajo Cauca Antioqueño	18
Figura 2 Diagrama de flujo de la metodología	20
Figura 3 Nubosidad en las imágenes satelitales para 2022	22
Figura 4 Comparación imágenes satelitales	25
Figura 5 Minería en el Bajo Cauca 2022.	26
Figura 6 Minería en el Bajo Cauca 2023.	26
Figura 7 Cambio en la minería en el Bajo Cauca 2022 -2023	27
Figura 8 Minería que aparece en el Bajo Cauca 2022 -2023.	28
Figura 9 Minería que se mantiene en el Bajo Cauca 2022 -2023.	28
Figura 10 Minería que desaparece en el Bajo Cauca 2022 -2023.	29

Siglas, acrónimos y abreviaturas

CASCDH	Centro de Analítica de Seguridad, Convivencia y Derechos Humanos
NDVI	Índice de Vegetación Normalizado
EVOA	Explotación de Oro de Aluvión
SGSG	Servicio Geológico de los Estados Unidos
WRS	Worldwide Reference System
UNODC	Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito

Resumen

La minería en el Bajo Cauca y en general en el departamento de Antioquia es una actividad de suma importancia social y ambiental, por lo tanto, se requiere de un análisis a profundidad. En este caso, se trató sobre la minería de aluvión y las repercusiones que tiene en el cambio de la vegetación natural de la zona. Para esto se utilizaron imágenes satelitales (Landsat) en los años 2022 y 2023, la herramienta de procesamiento ArcGIS Pro, material bibliográfico y así mismo la información suministrada por el CASCDH. Se tuvo en cuenta la variabilidad temporal e interestacional para hacer las respectivas comparaciones en el NDVI de la zona y de las áreas en las que la minería disminuyó, se mantuvo o aumentó. Luego de realizar el respectivo análisis, se pudo concluir que la minería en este periodo de tiempo disminuyó en cuatro de los seis municipios que conforman la subregión del Bajo Cauca, siendo las decisiones gubernamentales de frenar y/o reanudar los operativos contra la minería ilegal de la zona una de las posibles razones.

Palabras clave: minería, NDVI, Landsat, ArcGIS, cobertura, Bajo Cauca, Antioquia

Abstract

Mining in Bajo Cauca and in general in the department of Antioquia is an activity of utmost social and environmental importance, therefore, an in-depth analysis is required. In this case, it was about alluvial mining and the repercussions it has on the change of the natural vegetation of the area. For this, satellite images (Landsat) in the years 2022 and 2023, the ArcGIS Pro processing tool, bibliographic material and the information provided by the CASCDH were used. Temporal and interseasonal variability was taken into account to make the respective comparisons in the NDVI of the area and the areas in which mining decreased, remained or increased. After carrying out the respective analysis, it was concluded that mining in this period of time decreased in four of the six municipalities that make up the Bajo Cauca subregion, being the government decisions to stop and/or resume operations against illegal mining of the area one of the possible reasons.

Keywords: mining, NDVI, Landsat, ArcGIS, coverage, Bajo Cauca, Antioquia

1. Introducción

En Colombia, en la última década, se ha registrado un crecimiento significativo tanto en el volumen como en el valor de la producción de los bienes primarios y en particular en el sector minero y de hidrocarburos, afectando positivamente y de manera importante el producto interno bruto, PIB, del país. Sin lugar a duda, el flujo de recursos proveniente de esta actividad es cada vez mayor y las proyecciones muestran que su tendencia creciente se mantendrá. Así, el sector de la minería cobra importancia por el impacto social y ambiental de la actividad del sector. (Martínez, 2012)

La región del Nordeste y Bajo Cauca Antioqueño, ha participado históricamente con casi el 50% de la producción nacional de oro identificándose aproximadamente 640 pequeñas unidades de producción minera. Esta actividad ha influido enormemente en el desarrollo de la región, donde entre el 65 y 70% de la población depende de la minería, generando alrededor de 16 mil empleos directos caracterizándose por los bajos niveles de organización, sociedades de hecho en arreglos precarios, escaso acompañamiento y asistencia técnica, la falta de información y en especial el deterioro de las condiciones de trabajo digno y seguro, escasas alternativas económicas y altamente adversa al medio ambiente. La afectación ambiental es de grandes proporciones dado que se vierten al ambiente ente 50 y 100 toneladas de mercurio cada año.(ONUDI & CORANTIOQUIA, 2012)

Para mejorar este contexto, el MinEnergía y la Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC), con el apoyo de la Sección de Asuntos Antinarcóticos y Aplicación de la Ley (INL) de la Embajada de los Estados Unidos de América en Colombia, desde hace cinco años han concentrado esfuerzos y experticias para implementar un modelo de monitoreo que facilite la comprensión integral de la actividad minera. Uno de los pilares de este modelo está basado en la detección de las evidencias de explotación de oro de aluvión (EVOA) por medio de imágenes satelitales y herramientas de percepción remota. (UNODC & Ministerio de Minas y Energía, 2022)

Desde el Centro de Analítica de Seguridad, Convivencia y Derechos Humanos (CASCDH) de la Secretaría de Seguridad y Justicia de la Gobernación de Antioquia, se realiza el monitoreo de estas zonas con remoción de cobertura vegetal debido a la explotación minera y se pretende corroborar

su efectividad para la detección de EVOA (UNODC & Ministerio de Minas y Energía, 2022) y a su vez establecer posibles relaciones con su aumento o disminución a través de los años.

Debido a esto, en este trabajo con ayuda de diferentes herramientas de procesamiento como ArcGIS Pro se buscó encontrar el comportamiento de la minería entre los años 2022 y 2023 teniendo en cuenta diferentes factores como lo fue la disponibilidad de imágenes e información encontrada por medio de revisión bibliográfica.

2. Planteamiento del problema

La minería en el departamento de Antioquia es un problema real que afecta tanto al factor social como medio ambiental, por esto diferentes entidades como el Ministerio de Energía, la Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC), entre otros han concentrado esfuerzos y experticias para implementar modelos de monitoreo que facilite la comprensión integral de la actividad minera, resaltando la importancia de llevar un seguimiento de su evolución respecto al tiempo por medio de las imágenes satelitales y estudios sobre cambios en la vegetación con el objetivo de apoyar la toma de decisiones a las entidades encargadas.

2.1 Antecedentes

Desde hace ya muchos años se han realizado estudios e informes sobre los impactos de la minería en Colombia, por ejemplo, desde el 2012 autores como Astrid Martínez Ortiz en nombre de FEDESARROLLO tratan temas como “El impacto socioeconómico de la minería en Colombia” donde habla sobre el desarrollo de la minería en el país a través de los años y sus aportes a la economía y a la sociedad como tal.

Al mismo tiempo, desde estos años se estudia por parte de la ONUDI y CORANTIOQUIA sobre las afectaciones de la minería a la salud humana por el uso de metales como el mercurio en su “Proyecto global del mercurio gmp-2, introducción de tecnologías más limpias en la minería y la extracción del oro artesanales” donde se aborda esta problemática en municipios del departamento de Antioquia, entre ellas la subregión del Bajo Cauca.

En 2021 autores como Cristian Camilo Pulido Vergel de la Universidad De La Salle, realizó el “Estudio multitemporal del cambio de cobertura y usos del suelo a través de un análisis de imágenes satelitales en el bajo cauca antioqueño” para un periodo de 34 años donde se concluye la utilidad del sensoramiento remoto para la identificación de cambios en la superficie terrestre.

Actualmente el Ministerio de Minas y Energía y la UNODC realizan de forma periódica el “Estudio Explotación de oro de aluvión. Evidencias a partir de percepción remota”, siendo el último informe el de 2022 donde se habla sobre los hallazgos del monitoreo llevado a cabo en el territorio nacional durante el 2021, estando los municipios del Bajo Cauca dentro de los diez municipios que concentran el 54 % de la detección de EVOA.

3. Justificación

De 101 municipios con EVOA en el país, 10 de ellos concentran el 54 % de la detección nacional. De estos municipios se obtiene el 26 % de la producción de oro nacional y se presenta alta explotación ilícita de oro. Estos territorios se caracterizan por que, además de la explotación ilícita, algunos tienen presencia de cultivos de coca, presentan altos niveles de pobreza y bajos índices de desarrollo (UNODC & Ministerio de Minas y Energía, 2022). Estas explotaciones ilegales de minería al no contar con el correspondiente título minero, evade el pago de impuestos y de regalías. Adicionalmente, su régimen laboral no permite a los trabajadores acceder a beneficios en temas de seguridad social y ocupacional (Martínez, 2012).

En estos municipios existen Zonas excluibles de la minería que corresponden a territorios de protección y desarrollo de recursos naturales renovables y ambientales en los que la ley determina que no se podrán ejecutar obras de exploración y explotación minera. En el 2021, de 98.567ha detectadas con EVOA, 37.733 ha están bajo la categoría de Explotación ilícita localizada en estas Zonas excluibles de la minería (UNODC & Ministerio de Minas y Energía, 2022)

Es importante tener en cuenta que los impactos de la extracción de minerales desarrollada sin lineamientos ambientales rigurosos no solo incluyen la deforestación, sino también la excavación desordenada y desviación del cauce natural de los ríos; el deterioro de cursos de agua superficiales debido al aumento de sedimentos, la disminución de caudales, la contaminación con grasas, aceites, mercurio y cianuro; lodos de perforación y aguas residuales (lo cual afecta la

disponibilidad de agua de las poblaciones); la contaminación de suelos, el lavado de dinero por parte de actores armados, entre otros (MINAMBIENTE & IDEAM, 2019).

Teniendo en cuenta que estos procesos de cambio se presentan de forma acelerada, se hace necesario la incorporación de diferentes métodos que permitan identificar de manera más rápida y precisa el cambio en la cobertura terrestre, causado por la minería de aluvión en el departamento y en el país, puesto que esta representa un importante pilar en la economía, pero así mismo, un riesgo inminente al medio ambiente. Esto permitirá identificar a largo plazo como afecta o favorece esta actividad extractiva a las comunidades y al medio ambiente, además de entender la evolución de los cambios, sus consecuencias y generar alternativas de intervención de los diferentes actores estatales.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Identificar a través de imágenes de satélite multiespectrales y algunos índices paramétricos los cambios de cobertura vegetal en zonas de minería en Antioquia considerando la variabilidad temporal e interestacional.

4.2 Objetivos específicos

- Detectar y mapear sitios de minería utilizando datos de Landsat y el uso del software ArcGIS Pro.
- Determinar las bandas o índices espectrales óptimos para discriminar la minería de otros usos de la tierra.
- Identificar la transformación de coberturas de minera en la subregión del Bajo Cauca que fue utilizada como zona piloto.

5. Marco teórico

Colombia cuenta con dos tipos de yacimientos, de acuerdo con las condiciones geológicas de formación: primarios, conocidos como de filón o veta, donde predomina la explotación subterránea, y secundarios o de aluvión, con explotación a cielo abierto. A su vez, estos yacimientos presentan dos modalidades básicas en cuanto al modelo de arranque del material: por medios manuales, es decir, sin uso de maquinaria, y con uso de maquinaria. En este sentido, el tipo de explotación y la maquinaria utilizada generan en el territorio evidencias físicas que, en función de su dimensión, pueden ser detectables y medibles mediante la percepción remota, esto es, con el uso de imágenes satelitales (UNODC & Ministerio de Minas y Energía, 2022).

Los sensores remotos son sistemas o instrumentos utilizados para recolectar información rápida y viable de un objeto, área o fenómeno a distancia. Dicha información puede ser procesada e interpretada mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para tener una mejor comprensión. Los sensores remotos instalados a bordo de una plataforma son los más utilizados en los últimos años, y registran la energía electromagnética emitida o reflejada por la superficie de un objeto en distintas bandas del espectro electromagnético. Estos registros incluyen longitudes de onda desde las más cortas (gamma y radiográficas) hasta las más largas (microondas y de radiodifusión). Dentro de las longitudes de onda más cortas están las ultravioleta, que son muy prácticas para los sensores. Las plataformas son los satélites (LANDSAT, METEOSAT, SPOT, entre otros) o aviones que transportan los equipos requeridos para la captura, almacenamiento y transmisión a distancia de las imágenes, denominados sensores (Veneros et al., 2020).

En este proyecto se utilizó el programa Landsat, el cual consiste en una serie de misiones satelitales de observación de la Tierra gestionadas conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Hasta la fecha, se han realizado nueve misiones, ocho de las cuales han estado operativas. En este proyecto se utilizaron las misiones 8 y 9 de Landsat que cumplen el papel fundamental del programa Landsat en el monitoreo, la comprensión y la gestión de los recursos terrestres necesarios para sustentar la vida humana. El cambio del uso de la tierra tiene profundas consecuencias para el clima y el cambio climático, la función y los servicios de los

ecosistemas, el ciclo y el secuestro del carbono, la gestión de los recursos, la economía nacional y mundial, la salud humana y la sociedad (NASA, 2024)

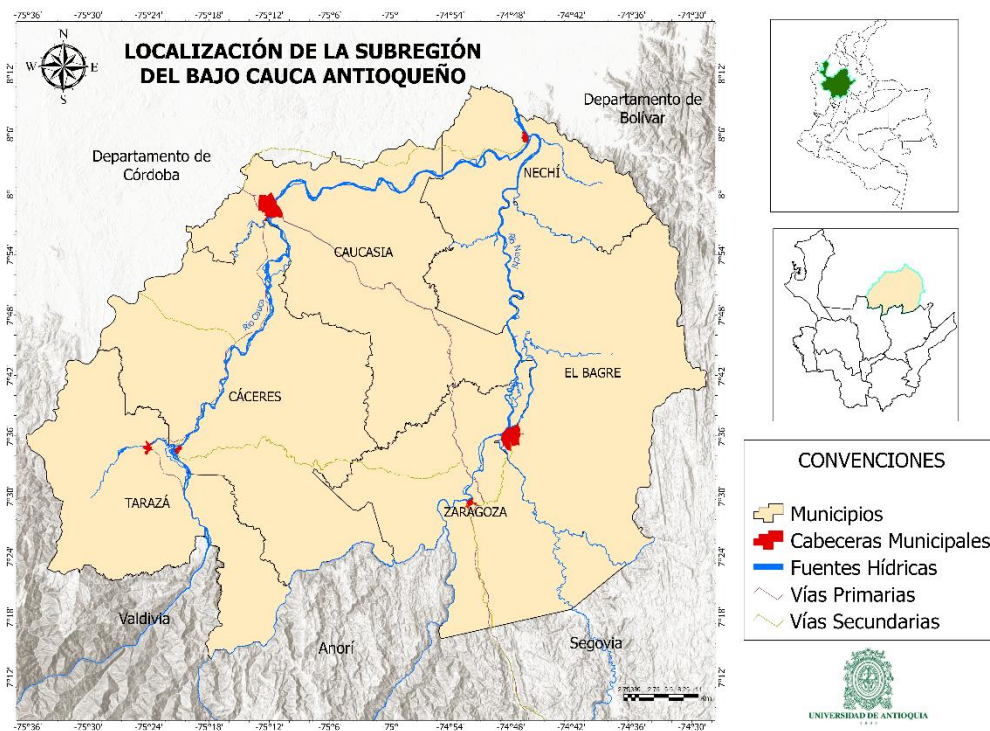
El monitoreo de la vegetación es una herramienta esencial para la conservación de los ecosistemas de páramos, especialmente en regiones como Antioquia. La teledetección, mediante el análisis multiespectral de imágenes satelitales, permite evaluar la salud de la vegetación de manera precisa y eficiente (Mejia et al., 2024).

El NDVI es un índice de vegetación que se utiliza para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja. Para obtener este índice debemos operar con las bandas de la imagen de la siguiente forma: $\text{Landsat 8 (5-4) / (5+4)}$ (Mejia et al., 2024). Con ayuda de la herramienta de procesamiento de ArcGIS Pro se calculó el NDVI. Estos índices de vegetación se han usado en los últimos años para determinar el tipo de cobertura, evaluar su variación temporal o establecer el estado de salud de cultivos a partir de estimaciones de características como vigor vegetal, contenido de clorofila, estado nutricional o estado hídrico. En diversos estudios, se han propuesto una variedad de índices de vegetación que usan diferentes bandas en el espectro visible e infrarrojo cercano para obtener características de interés (Revelo et al., 2020)

El Bajo Cauca Antioqueño es una de las nueve subregiones que componen el departamento de Antioquia (**Figura 1**), con una extensión de 8.485 Km², está localizada al norte del departamento, sobre la cordillera Central, entre las serranías de Ayapel y San Lucas, y se ubica sobre la cuenca del sistema fluvial Cauca-Nechí. Limita con el departamento de Córdoba tanto por el norte como el oeste, con el departamento de Bolívar al este, y con las subregiones Norte y Nordeste al sur; está conformada por seis departamentos: Cáceres, Caucasia, El Bagre, Nechí, Tarazá y Zaragoza (Pulido, 2021).

Figura 1

Mapa de localización del Bajo Cauca Antioqueño



Fuente: Autor

Esta subregión se caracteriza por ser una zona mayoritariamente de relieve plano, con alturas inferiores a los 500 m.s.n.m., como las planicies sedimentarias del río Cauca y terrenos inundables al norte en la cuenca del río San Jorge; este relieve está presente en los municipios de Cauca, al norte de Cáceres y Zaragoza, y al occidente de Nechí y El Bagre; la zona también presenta zonas de relieve de hasta 2000 m.s.n.m., como el páramo de Ventanas, la Serranía de Ayapel y la Serranía de San Lucas, este relieve está presente en los municipios de Tarazá, al sur de Cáceres, y oriente de Nechí y El Bagre (Pulido, 2021).

Teniendo en cuenta las proyecciones del DANE para el 2020 la subregión del Bajo Cauca contaba con 260.681 habitantes. El bienestar de las personas deriva de diferentes aspectos es así como la subregión presenta la mayor vulnerabilidad social debido a sus limitadas condiciones y precariedades que han alterado la calidad de vida de las personas y su desarrollo concentradas en las zonas rurales de la subregión Las mayores privaciones se dan por el empleo informal y bajo

logro educativo generados por las bajas remuneraciones con baja capacidad económica en las personas para acceder a servicios adecuados como vivienda, salud, educación, recreación etc. (Henaó et al., 2021).

La subregión tiene una importante concentración en producción de oro y plata. La minería se ha constituido como un renglón predominante de la subregión seguida de producción piscícola, la agricultura y la ganadería doble propósito (carne y leche). Además, tiene como visión posicionarse en el turismo como la ruta del oro y la cultura anfibia (Henaó et al., 2021). En la zona existen unos 1.200 entables mineros que generan aproximadamente 48.000 empleos directos informales, no incorporan conocimientos técnicos ni adoptan labores de remediación, ocasionando altos impactos ambientales. Para extraer 17 toneladas de oro se producen 48 millones de toneladas de residuos como gravas, arena y arcillas, y se aplican 108 toneladas de mercurio (David, 2017).

En el sitio se practica la explotación de oro de aluvión, que consta de actividades y operaciones mineras adelantadas en riberas o cauces de los ríos; también se emplean métodos de minería aluvial para la extracción de minerales y materiales en terrazas aluviales. En los lechos el oro es liberado en su totalidad de las partículas acompañantes como cuarzo, carbonatos, arcillas, sulfuros etc. y por su elevada densidad, estabilidad física y química, quedan las laminillas de oro que forman partículas con apariencia de escamas y pepitas o polvo, quedando apto para su recuperación como “oro libre” (David, 2017)

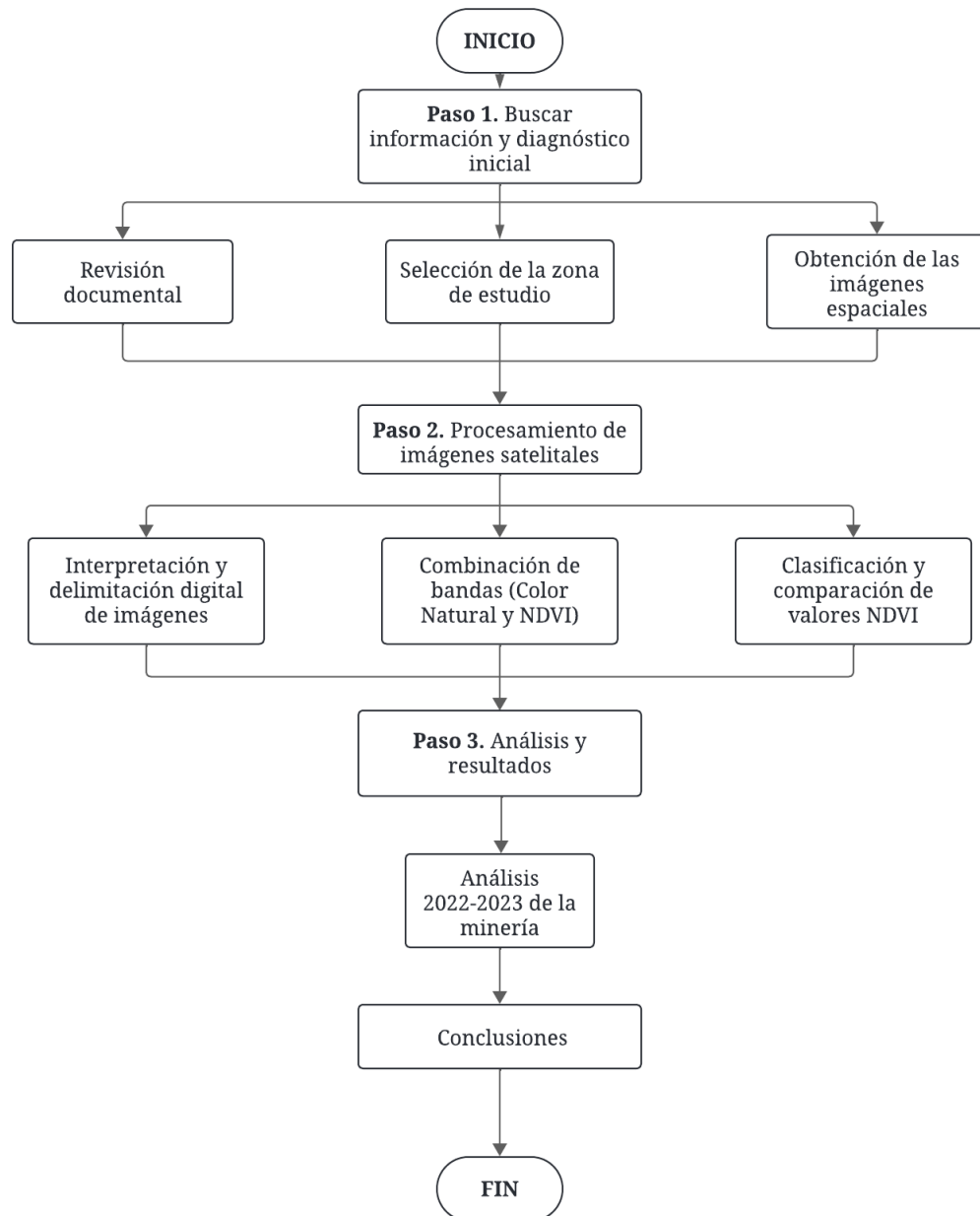
En estos municipios a través de los años ha habido importantes manifestaciones sociales entre el gremio minero y los entes gubernamentales, debido a los diferentes operativos realizados en contra de los grupos armados y la ilegalidad. En específico, a mediados de 2022 luego de un paro minero durante varios días, el Gobierno logró establecer diálogos y en busca de generar procesos de formalización a mineros se suspendieron los operativos policiales y la incautación de maquinaria. Sin embargo, a inicios de 2023 estos operativos volvieron los operativos por orden de la procuraduría (UPME, 2024).

6. Metodología

Se representa la metodología utilizada en el siguiente diagrama de flujo y luego descritas sus diferentes fases

Figura 2

Diagrama de flujo de la metodología



Fuente: Autor

6.1 Paso 1. Buscar información y diagnóstico inicial

6.1.1. Revisión documental

Se recopiló información documental de diferentes bases de datos sobre la minería en Antioquia y los puntos focales de esta, con ayuda de los datos del EVOA suministradas por el CASCDH.

6.1.2. Selección de la zona de estudio

Se seleccionó el Bajo Cauca como la zona de estudio debido a su localización, dinámicas socioeconómicas y poblacionales, que la hicieron un punto focal de minería y de cambios importantes en el uso del suelo.

6.1.3. Obtención de las imágenes espaciales

La información cartográfica, se obtuvo de la base de datos del CASCDH, se utilizaron archivos vectoriales en formato shapefile para obtener la ubicación espacial de los límites departamentales y municipales. Luego se eligieron los años de estudio por medio de la revisión de imágenes satelitales a través del sitio web Earth Explorer, propiedad del Servicio Geológico de los Estados Unidos (SGSG), teniendo en cuenta que, las imágenes provenientes de los satélites Landsat, están organizadas según el sistema WRS (Worldwide Reference System); para Colombia, las escenas Landsat se encuentran entre la columna (Path) 3 y 14 y la fila (Row) 49 y 63.

Se seleccionaron las fechas: 09 de julio de 2022 y 05 de agosto 2023, esto debido al porcentaje de nubosidad. Así mismo y debido a este fenómeno en el análisis no se tiene en cuenta al municipio de Tarazá y algunas zonas del municipio de Cáceres, ya que la cantidad de nubes imposibilitaban el correcto cálculo del NDVI y requerían de otro tipo de procesamiento (**Figura 3**).

Figura 3

Nubosidad en las imágenes satelitales para 2022



Fuentes: Autor

6.2 Paso 2. Procesamiento de imágenes satelitales

Para el procesamiento de imágenes satelitales se utilizó ArcGIS Pro, que es la aplicación SIG de escritorio profesional con plenas funcionalidades de Esri.

Dado que el área de estudio no logra ser abarcado por una sola imagen, se procesaron dos imágenes satelitales por año de estudio, por lo cual, se construyó un mosaico de estas por medio de la herramienta “Mosaic”.

6.2.1. Interpretación y delimitación digital de imágenes

Utilizando los shapefiles antes mencionados y las imágenes satelitales, se realiza un recorte de estas por medio de la herramienta “Clip Raster” para delimitar la zona de estudio: los municipios de la subregión del Bajo Cauca.

6.2.2. Combinación de bandas (Color Natural y NDVI)

La herramienta utilizada en ArcGIS Pro es para realizar las diferentes combinaciones de bandas requeridas es “Composite Bands”.

Para obtener el color natural en Landsat 8 y 9 se requiere la combinación de las bandas 4,3,2 que representan el rojo, verde y azul respectivamente. Para el NDVI se requieren las bandas 5 y 4, siendo el visible rojo cercano y el rojo respectivamente y su cálculo se realiza por medio de la herramienta “Raster Calculator” y de la **Ecuación 1**.

Ecuación 1.

NDVI

$$NDVI = \frac{B5 - B4}{B5 + B4}$$

6.2.3. Clasificación y comparación de valores NDVI

El NDVI para ambas fechas posee un rango de valores los cuales se diferenciaron manualmente para luego ser clasificado en 3 diferentes clases: Agua, minería y vegetación y por medio de la herramienta “Raster Calculator” se separó como un nuevo archivo los datos que estaban clasificados como Minería.

Utilizado la misma herramienta, se calculó con ayuda de los condicionales los diferentes casos de desarrollo de la minería: Aparece, Se Mantiene o Desaparece.

6.3 Paso 3. Análisis 2022-2023 de la minería

Luego de obtener la minería que aparece, se mantiene y desaparece en el periodo de tiempo seleccionado, se calculó por medio de la herramienta “Zonal Statistics as Table” y por medio de la Ecuación 2 se calculó el área en Km².

Ecuación 2.

Cálculo del área en kilómetros cuadrados

$$Area (Km^2) = \frac{Suma * (30 * 30)}{1000000}$$

Todo esto teniendo en cuenta que el tamaño de celda es 30x30 y que la Suma se refiere a la cantidad de celdas con la condición inicial y a que el sistema de referencia arroja datos en metros cuadrados.

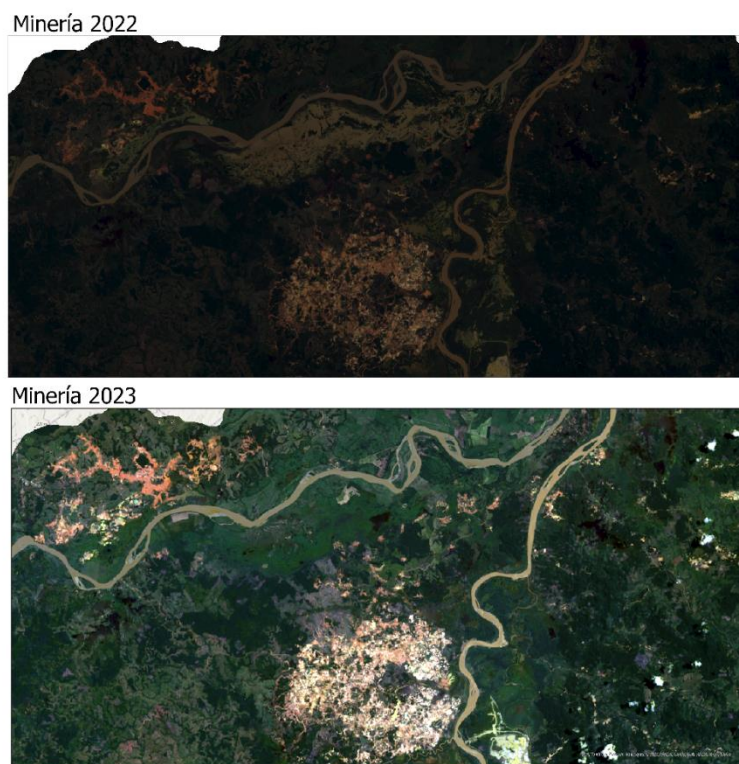
Luego de tener este dato, se realizan comparaciones entre municipios en los dos diferentes años.

7. Resultados

A pesar de ser muy clara la presencia del cambio respecto al suelo descubierto en las imágenes satelitales (**Figura 4**), por medio del NDVI se pudo separar aquellas zonas que presentaban o que en algún momento presentaron minería de las zonas con cultivos o vegetación pobre.

Figura 4

Comparación imágenes satelitales.



Fuente: Autor

Tanto en la **Figura 5** como en la **Figura 6** se pueden visualizar aquellas zonas en las cuales, para los dos años de estudio, se presenta minería de aluvión, siendo visualmente mayor aquella registrada en el año 2022.

Figura 5 Minería en el Bajo Cauca 2022.

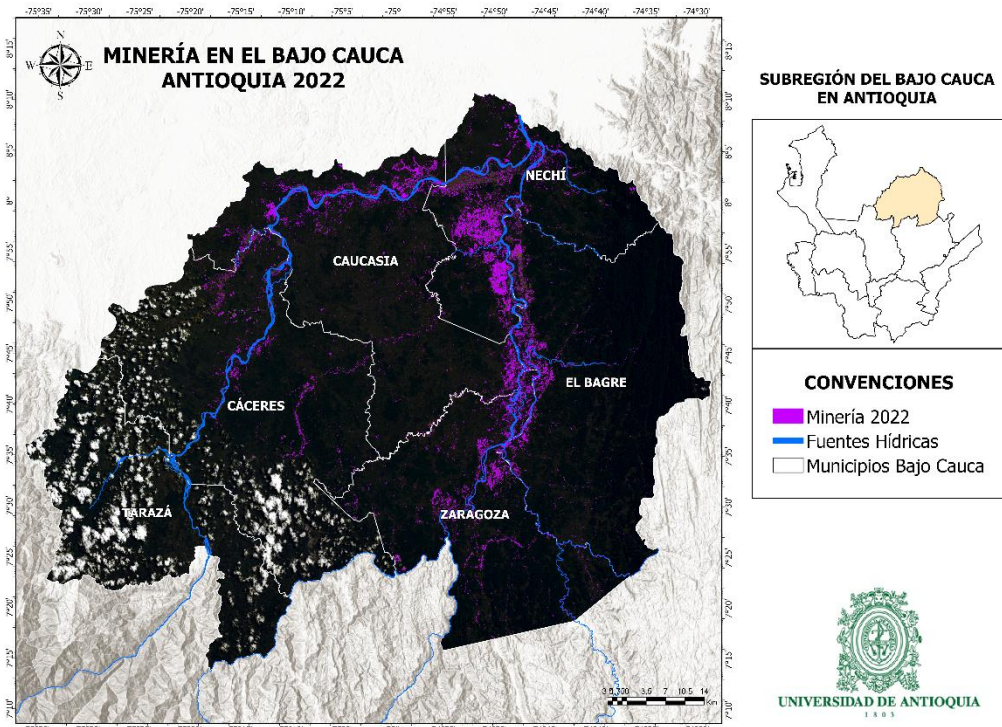
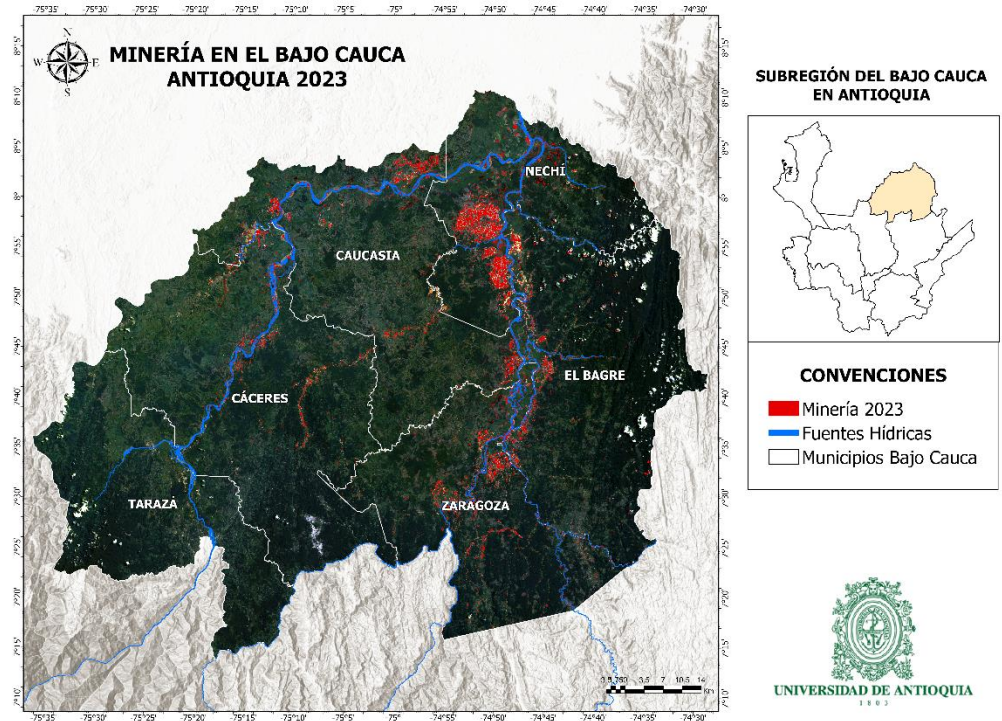


Figura 6 Minería en el Bajo Cauca 2023.

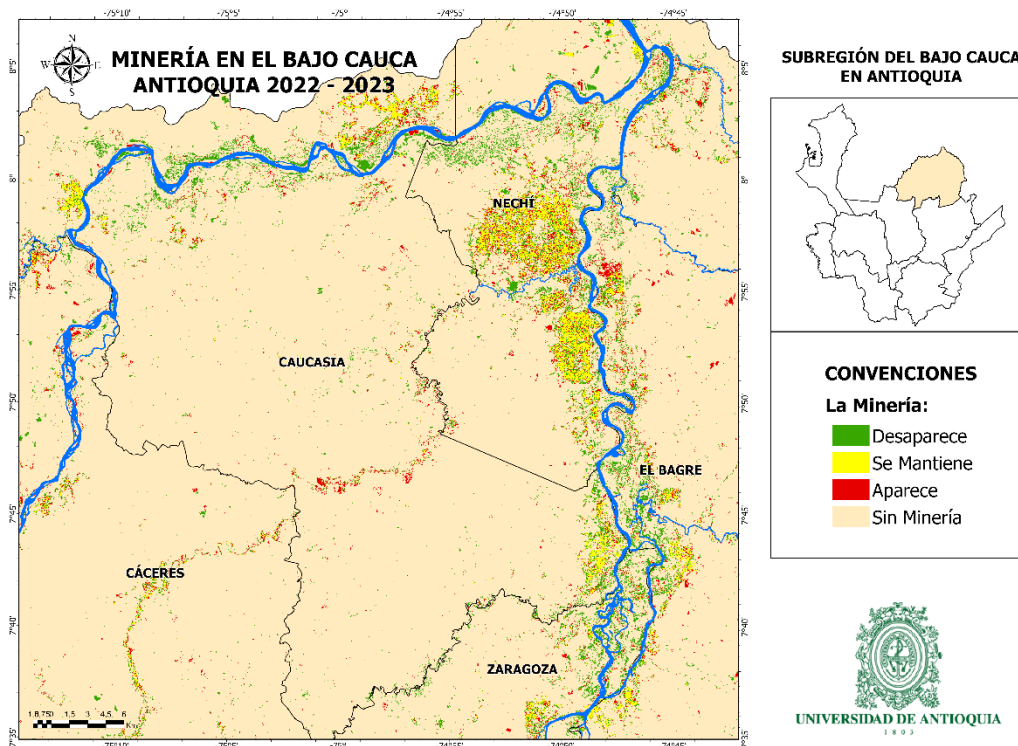


Fuente: Autor

Luego de tener una vista general de la minería de cada año seleccionado se procesó el cambio de esta durante el periodo entre 2022 y 2023 (**Figura 7**) donde los puntos donde Se Mantiene la minería se concentran en grandes zonas en los municipios de Nechí y El Bagre.

Figura 7

Cambio en la minería en el Bajo Cauca 2022 -2023.



Fuente: Autor

Así mismo, pero de forma individual se diferencié la minería que: Aparece (**Figura 8**), Se mantiene (**Figura 9**) y Desaparece (**Figura 10**) a través del tiempo. Allí a pesar de lo que se pueda interpretar de la Figura # podemos apreciar más claramente la predominancia de la minería que Desaparece en toda la subregión.

Figura 8 Minería que aparece en el Bajo Cauca 2022 -2023.

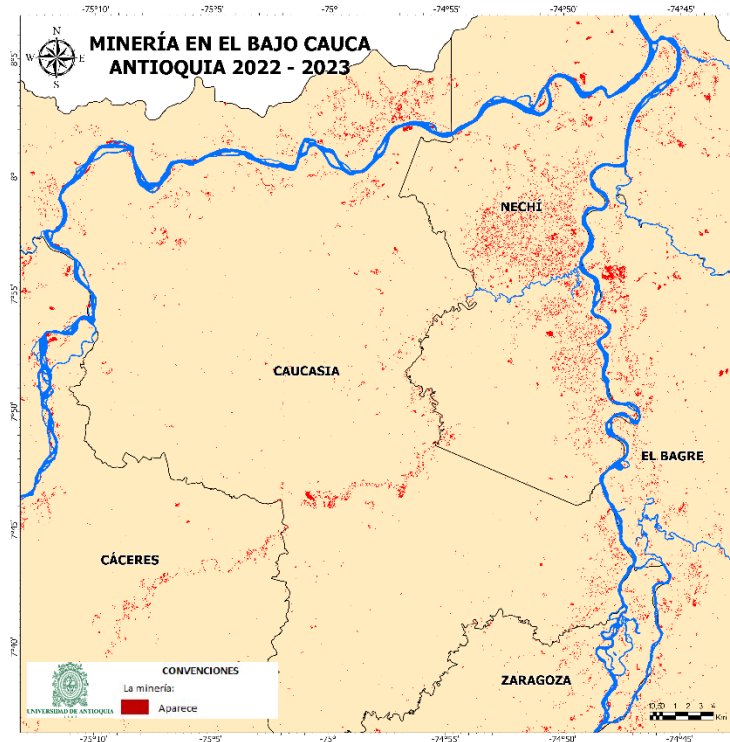
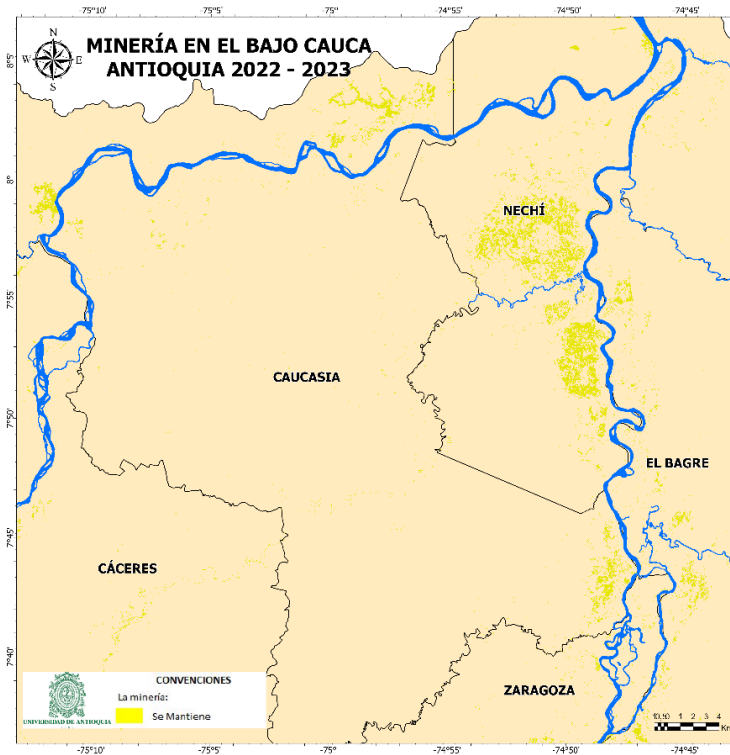
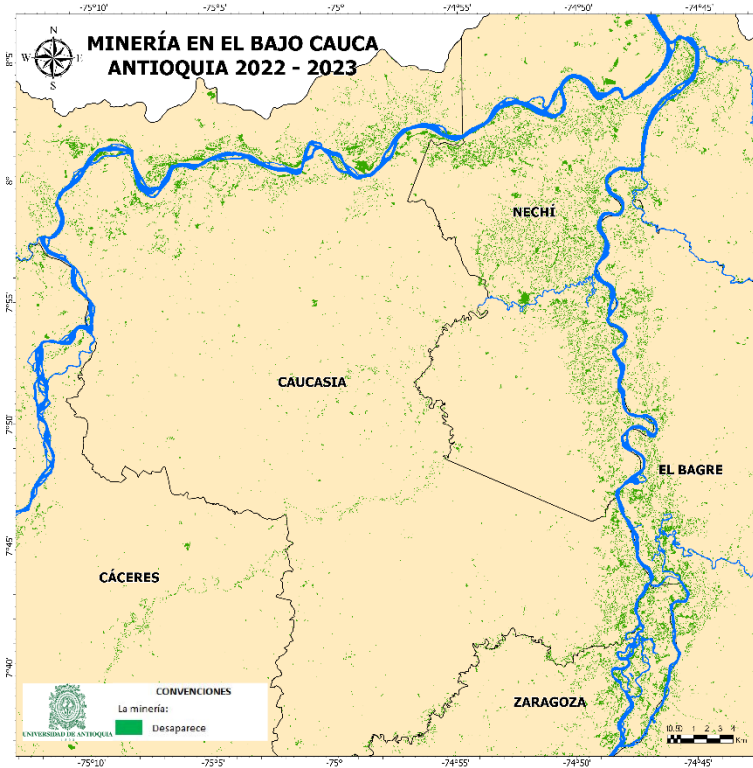


Figura 9 Minería que se mantiene en el Bajo Cauca 2022 -2023.



Fuente: Autor

Figura 10 Minería que desaparece en el Bajo Cauca 2022 -2023.



Fuente: Autor

Luego de tener las imágenes procesadas, se analizó su tabla de atributos, para llegar a datos cuantitativos sobre el cambio en la minería de esta subregión. En la **Tabla 1** se puede apreciar el área de minería en kilómetros cuadrados para los años 2022 y 2023 de los municipios del Bajo Cauca (Recordando que Tarazá no fue cuantificado debido a la alta nubosidad en las imágenes satelitales disponibles) siendo Nechí el municipio con mas minería en ambos años. Así mismo se obtuvo el área de minería que Aparece, Se mantiene y Desaparece siendo mayor el área de aquella que desaparece en todos los municipios.

Tabla 1

Minería Bajo Cauca Antioqueño

Bajo Cauca Antioqueño	Cáceres	Caucasia	El Bagre	Nechí	Zaragoza	Total
Área Minería 2022 (Km2)	23,388	55,738	36,529	80,570	47,711	243,936
Área Minería 2023 (Km2)	17,911	33,180	26,198	57,317	31,501	166,108
Minería que Aparece	12,428	18,200	16,409	24,659	17,230	88,925
Minería que se Mantiene	5,483	14,981	9,766	32,653	14,249	77,131
Minería que Desaparece	17,906	40,758	26,761	47,917	33,440	166,782

Fuente: Autor

Teniendo en cuenta el área de cada municipio también obtenido del geoprocesamiento (**Tabla 2**) se calculó el porcentaje de estos que presenta minería en ambos años (**Tabla 3**) siendo igualmente Nechí quien posee mayor porcentaje respecto a su área municipal. Así mismo se compararon estos porcentajes de los cuales solamente se mantienen constantes en el municipio de Cáceres, en el resto de la subregión los porcentajes tienden a disminuir, lo que significa (**Tabla 4**) que de igual forma la minería disminuye.

Tabla 2

Área de los municipios

Municipio	Area (km2)
Cáceres	938,096
Caucasia	1428,864
El Bagre	1200,787
Nechí	880,499
Zaragoza	1167,074

Fuente: Autor

Tabla 3

Porcentaje de minería respecto al área del municipio

Bajo Cauca Antioqueño	Cáceres	Caucasia	El Bagre	Nechí	Zaragoza	Total
Área Minería 2022	2%	4%	3%	9%	4%	4%
Área Minería 2023	2%	2%	2%	7%	3%	3%
Cambio 2022 - 2023	-	↓	↓	↓	↓	↓

Fuente: Autor

Tabla 4

Minería Bajo Cauca Antioqueño

Cambio	Convención
Aumenta	↑
Se Mantiene	-
Disminuye	↓

Fuente: Autor

8. Discusión

Como se pudo confirmar visualmente en la Figura # donde se distinguen claramente las zonas de suelo descubierto con posible presencia de minería y en las Figuras # y # donde se confirman cuáles de ellas efectivamente lo son, podemos afirmar que durante el periodo 2022 – 2023 la minería disminuyó en la mayoría de los municipios que conforman el Bajo Cauca Antioqueño. Así mismo, de forma cuantitativa los análisis nos arrojan el mismo resultando, siendo tendencia la disminución de las zonas con presencia de minería.

La disminución de este fenómeno puede ser debido a diversos factores tanto sociales como ambientales, sin embargo, un hecho importante durante este periodo de tiempo fue la reactivación de los operativos por parte del Gobierno para frenar la minería ilegal y el deterioro del medio ambiente, que a pesar de que como se vio en la Figura # la minería no ha parado y en algunos lugares como se ilustra en la Figura # el daño persiste o ya es permanente, la tendencia general en los municipios fue disminuir aproximadamente un 1% de minería respecto a su área.

Sin duda alguna, la minería genera beneficios para el país y las comunidades, pero también es responsable de diferentes conflictos en medio de los territorios en los que se encuentra presente, por ejemplo, el establecimiento de grupos armados ilegales que impulsan la minería ilegal y el narcotráfico como forma de financiación; El deterioro de la seguridad ciudadana producto de amenazas y extorsiones a los mineros y comerciantes por estructuras criminales.

A pesar de conocer que cualquier actividad económica genera un impacto en el medio ambiente, la magnitud de este depende de la naturaleza de cada actividad y de cómo se lleva a cabo, en el caso de la minería de aluvión, sin importar su escala o si es legal o no, esta impacta de manera negativa en diferentes componentes del ecosistema, tanto abióticos como bióticos y esto lo podemos apreciar en todas las imágenes donde la minería se desarrolla en su mayoría a orillas de las fuentes hídricas de la subregión.

9. Conclusiones

Para culminar este proyecto es importante resaltar la clara importancia del sensoramiento remoto, ya que nos permite conocer la situación y/o el estado de una zona a la cual, por diferentes motivos, por ejemplo, las situaciones de orden público, es difícil su acceso en campo. Así mismo se facilita la medición de áreas y la diferenciación de zonas con diferentes naturalezas, como agua, suelo descubierto por actividades antropogénicas o tipos de vegetación.

Pero sin lugar a duda una de sus mayores utilidades debería ser la posibilidad de comparar todas estas características a través del tiempo, siendo de suma importancia para la toma de decisiones respecto a lo que se debe o no se debe hacer en estos territorios y la forma más adecuada de proceder teniendo en cuenta los factores sociales y medioambientales.

Según los resultados obtenidos y sin darle una causa directa o definitiva a las razones por las cuales se presentan disminuciones en la minería de aluvión en la subregión, cabe resaltar que el deterioro del suelo sigue siendo un factor importante y significativo. Y aunque se requiere de otro tipo de análisis para determinar el estado de las fuentes hídricas, se podría asumir que estas presentan contaminación importante debido a la minería que se realiza en las orillas de los ríos y quebradas, por lo que este estudio queda abierto a posibles continuaciones en las que se tenga en cuenta, por ejemplo, el factor hídrico al momento de analizar las imágenes satelitales.

10. Referencias

- David, R. (2017). Procesos de degradación de suelos asociados a minería aurífera a cielo abierto, caso de estudio Bajo Cauca Antioqueño. *UNAL*. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/63113/98696584.2017.pdf?sequence>
- Henao, J., Osorio, M., & Arroyave, R. (2021). Perfil de Desarrollo Subregional - Subregión Bajo Cauca de Antioquia. *CTPA*. <https://ctpantioquia.co/subregion-de-bajo-cauca/>
- Martínez, A. (2012). Impacto socioeconómico de la minería en Colombia. *FEDESARROLLO*. <https://bit.ly/3VXU38P>
- Mejía, L., Morales, A., & Mendoza, Y. (2024). IDENTIFICACIÓN DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN Y ACTIVIDAD FOTOSINTÉTICA PARA LA PRESERVACIÓN DEL MONITOREO DE PÁRAMOS EN ANTIOQUIA. *UNAD*. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/62613>
- MINAMBIENTE, & IDEAM. (2019). Caracterización de las principales Causas y Agentes de la deforestación a Nivel Nacional: Período 2005-2015. *UNDP*. <https://www.undp.org/es/colombia/publicaciones/caracterizacion-de-las-principales-causas-y-agentes-de-la-deforestacion-nivel-nacional-periodo-2005-2015>
- NASA. (2024). *Landsat Science*. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/>
- ONUDI, & CORANTIOQUIA. (2012). PROYECTO GLOBAL DEL MERCURIO GMP-2, INTRODUCCION DE TECNOLOGIAS MAS LIMPIAS EN LA MINERIA Y LA EXTRACCION DEL ORO ARTESANALES. *CORANTIOQUIA*. <https://www.corantioquia.gov.co/wp-content/uploads/2022/01/DX-MERCURIO-SEGOVIA1.pdf>
- Pulido, C. (2021). ESTUDIO MULTITEMPORAL DEL CAMBIO DE COBERTURA Y USOS DEL SUELO A TRAVÉS DE UN ANÁLISIS DE IMÁGENES SATELITALES EN EL BAJO CAUCA ANTIOQUEÑO. *La Salle*. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1952/
- Revelo, D., Mejía, J., & Montoya, B. (2020). Análisis de los índices de vegetación NDVI, GNDVI y NDRE para la caracterización del cultivo de café (*Coffea arabica*). *Scielo*. <http://www.scielo.org.co/pdf/inde/v38n2/2145-9371-inde-38-02-298.pdf>

- UNODC, & Ministerio de Minas y Energía. (2022). Colombia Explotación de oro de aluvión Evidencias a partir de percepción remota 2021. *UNODC*. https://www.unodc.org/documents/colombia/2022/Junio/Informe_Colombia_Explotacion_d_e_Oro_de_Aluvion_Evidencias_a_Partir_de_Percepcion_Remota_2021_SP_.pdf
- UPME. (2024). EL ESTALLIDO DE UNA CRISIS: EL PARO MINERO EN EL BAJO CAUCA. *UPME*. https://www1.upme.gov.co/Documents/Enfoque-territorial/Resultados_convenios/4_Monografia_caso_oro_bajo_cauca_antioqueno.pdf
- Veneros, J., Garcia, L., & Morales, E. (2020). Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua. *Scielo*. <https://www.scielo.cl/pdf/idesia/v38n4/0718-3429-idesia-38-04-99.pdf>